УДК 621.114.32

МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ИММИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ИНФОРМАЦИОННЫХ МОНОИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

д-р техн. наук, доц. В.С. ЕРЕМЕНКО
(Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»;
канд. техн. наук., доц. В.М. МОКИЙЧУК, канд. техн. наук., доц. О.В. САМОЙЛИЧЕНКО
(Национальный авиационный университет, Украина)

Достоверность диагностики изделий из композиционных материалов определяется не только применяемыми физическими методами получения информации о техническом состоянии изделия, но и математическими моделями, положенными в основу методов диагностики, методиками обработки полученной информации с целью формирования пространства параметров и принятия диагностического решения. Поэтому, в задачах диагностики изделий из композиционных материалов наличие адекватной модели информационных сигналов в диагностической системе, которые характерны для объектов с различными типами дефектов или степенями поврежденности, имеет большое значение, поскольку это дает возможность решения широкого круга задач [1]. Во-первых, существование такой модели позволяет построить базу данных информационных сигналов, характеризующих возможные (характерные) дефекты композитов, которую можно использоваться для отработки методики диагностики и обучения информационно-диагностической системы в целом без физического изготовления контрольных образцов. Во-вторых, разработанная модель сигнала может использоваться для формирования и принятия решающего правила диагностики, а также классификации входных данных, для выбора наиболее оптимальной архитектуры системы, оценки эффективности обучения, выбора порога чувствительности информационно-диагностической системы, ее валидации, определения достоверности контроля и, в случае необходимости, корректировки параметров системы.

Задача синтеза импульсного информационного сигнала с заданными параметрами наиболее адекватно решается с помощью его спектрального представления. И если в случае непрерывного гармонического сигнала преимущество имеет тригонометрическое преобразование Фурье, то для моноимпульсных сигналов возникает проблема выбора надлежащего спектрального базиса, обеспечивающего минимальное количество информативных спектральных составляющих, которые претерпевают существенные изменения в зависимости от степени повреждения объекта контроля. В работе предлагается построение собственного базиса для спектрального представления информационных сигналов дефектоскопа, реализующий метод низкоскоростного удара при диагностике сотовых панелей с ударными повреждениями [2].

Информационные сигналы, которые обрабатываются в информационно-диагностических системах, характеризуются детерминированной и случайной компонентами. Случайная компонента информационного сигнала описывает такие неучтенные факторы, как неоднородность изменения физических характеристик в дефектных областях, изменения степени поврежденности контролируемого образца, наличие шума в измерительных каналах, случайные погрешности в преобразователях, пространственную неоднородность композитов и т.д. Таким образом, для построения адекватной имитационной модели таких сигналов следует учитывать обе компоненты.

Физические модели, описывающие преобразования информационных сигналов в зависимости от дефектности изделия, имеют ряд существенных недостатков, которые не позволяют их использовать при расчетах и формировании пространства диагностические признаков. К этим недостаткам можно отнести зависимость податливости дефектной области и ее механического импеданса от физических характеристик краевых зон дефектов и их формы, невозможность учета влияния всей номенклатуры дефектов композиционных материалов на их механические характеристики, значительные трудности при расчете частотозависимых механических импедансов зон с реальными дефектами. Поэтому, целесообразным является построение стохастических моделей информационных сигналов, которые позволяют учитывать их случайные изменения во времени, применить методы статистической обработки, расширить пространство диагностических признаков и, тем самым, увеличить достоверность диагностики [3].

Имитационная модель информационного сигнала может быть представлена следующим выражением:

$$S_i = \sum_{j=0}^{n-1} \left[a_{i,j} + \eta_j \right] g_j \text{ , } i = \overline{0, L-1},$$

где $a_{i,j}$ – детерминированная компонента сигнала, находится по алгоритму, через функцию распределения значений коэффициентов спектрального разложения в зависимости от степени повреждения объекта контроля; n_j –-случайная компонента, определяемая на основе собственных значений и собственных векторов ковариационой матрицы информационного сигнала; g_j – ортогональный базис; L – объем генерируемой выборки информационных сигналов; n — количество используемых компонентов в спектре сигнала.

Второй комплекс диагностических признаков, характеризующих случайную составляющую модели, определяется на основе преобразования Карунена-Лоева. Преобразование Карунена-Лоева имеет фундаментальное значение, потому что оно приводит к построению некоррелированных признаков. Таким образом, случайная составляющая описывается следующим выражением:

$$\eta_j = \sum_{k=0}^{n-1} \xi_k \phi_k(j) \text{ , } j = \overline{0, n-1},$$

где $\xi_k = \sum_{j=0}^{n-1} \eta_j \phi_k(j)$ – коэффициенты разложения, которые являются независимыми гауссовскими случайными величинами с дисперсиями $D_{\xi_k} = \sigma_k^2, k = \overline{0, n-1}$; $\left\{ \phi_k(j), k, j = \overline{0, n-1} \right\}$ – ортонормированный базис, элементы $\phi_k(j)$ которого являются собственными векторами ковариационной матрицы R реального сигнала. Дисперсии $D_{\xi_k} = \sigma_k^2, k = \overline{0, n-1}$, равны собственным числам $\lambda_k, k = \overline{0, n-1}$ ковартационной матрицы R, которые соответствуют собственным векторам $\phi_k(j), k = \overline{0, n-1}$. Элементы матрицы R находятся согласно уравнению:

$$r_{i,j} = \frac{\sum_{k=0}^{n-1} \left(v_{k,i} - m_i \right) \left(v_{k,j} - m_j \right)}{n-1},$$

где $\nu_{i,j}$ – элементы матрицы V коэффициентов спектрального разложения информационных сигналов X; m_i – элементы матрицы M математических ожиданий каждого коэффициента спектрального разложения сигналу. Матрицы V та M формируются следующим образом:

$$V = \begin{pmatrix} v_{0,0} & v_{0,1} & \cdots & v_{0,n-1} \\ v_{1,0} & v_{1,1} & \cdots & v_{1,n-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{N-1,0} & v_{N-1,1} & \cdots & v_{N-1,n-1} \end{pmatrix}, \quad M = \{m_0, m_1, \ldots, m_{n-1}\},$$

где N – количество реализаций информацонных сигналов; $m_i = \sum_{k=0}^{N-1} v_{k,i} / N$.

Полная энергия вектора $\eta = \{\eta_0, \eta_1, \ldots, \eta_{n-1}\}$ определяется как:

$$\sum_{i=0}^{n-1} R_{ii} = \sum_{k=0}^{n-1} \lambda_k .$$

Множество собственных чисел λ_k и собственных векторов $\phi_k(j)$ однозначно характеризуют ковариационную матрицу R (а значит и вектор η), поэтому выбирают второй комплекс признаков собственных чисел и соответствующих им собственных векторов ковариационной матрицы вектора η.

Поскольку каждый коэффициент спектрального разложения характеризуется различным значением рассеяния в зависимости от степени повреждения образца, то в процессе имитационного моделирования соответственно для каждого коэффициента будут установлены разные по значению собственные числа λ_k и собственные векторы $\phi_k(j)$. Таким образом, каждая из спектральных составляющих, учитываемых в модели, будет в разной степени подвергаться влиянию случайных факторов, что и происходит при анализе реальных информационных сигналов, получаемых при диагностике изделий из композитов. Данный подход позволяет наиболее полно описать реальный информационный сигнал и построить его адекватную модель.

Выбор коэффициентов ортогонального разложения a_{k_1}, $k_1 = \overline{0, n_1 - 1}$, собственных чисел λ_{k_2} и собственных векторов $\phi_{k_2}(j)$, $k_2 = \overline{0, n_2 - 1}$, $j = \overline{0, n-1}$ осуществляется с использованием реализаций оценок этих характеристик, полученных при анализе реальных информационных сигналов.

Для определения значения соответствующих коэффициентов разложения присущих информационным сигналам, которые описывают неизвестные дефекты в исследуемых образцах, необходимо получить функцию, аппроксимирующую распределение значений каждого из коэффициентов разложения в зависимости от степени поврежденности (дефектности) исследуемого образца. Такую функцию можно определить путем интерполяции известных значений коэффициентов разложения, например, кубическими сплайнами Эрмита. Далее для каждой спектральной составляющей необходимо выбрать необходимое значение степени поврежденности объекта диагностики, определить по установленным функциональным зависимостям значения спектральных составляющих и выполнить обратное преобразование.

Главным преимуществом сплайн интерполяции является ее устойчивость и низкая трудоемкость. Системы линейных алгебраических уравнений, которые необходимо решать для построения сплайнов, хорошо обусловлены, что позволяет получить коэффициенты полиномов с высокой точностью. Построение таблицы коэффициентов сплайна требует $O(N)$ операций, а вычисление значения сплайна в заданной точке – $O(\log_2 N)$.

Общее уравнение для полиномов Эрмита имеет вид:

$$H_n(x) = \sum_{j=0}^{n/2} \frac{(-1)^j}{2^j} \cdot \frac{n!}{j!(n-2j)!} x^{n-2j},$$

где n – степень полинома Эрмита.

Полиномы Эрмита образуют полную ортогональную систему на интервале $(-\infty, \infty)$ з весовым коэффициентом $e^{-\frac{x^2}{2}}$:

$$\int_{-\infty}^{\infty} H_n(x) H_m(x) e^{-x^2/2} dx = n! \sqrt{2\pi} \delta_{nm},$$

где δ_{nm} — дельта-символ Кронекера, $\delta_k(0) = 1, \delta_k(k \neq k_i) = 0$.

Данный метод интерполяции использует две контрольные точки и два вектора направлений. Интерполяция на интервале (x_k, x_{k+1}), де $k = \overline{1, N-1}$ (N – количество заданных точек на интервале интерполяции, которые разбивают весь интервал на заданное количество отрезков), задается формулой:

$$P(x) = h_{00}(t) p_0 + h_{10}(t) h m_0 + h_{01}(t) p_1 + h_{11}(t) h m_1, h = x_{k+1} - x_k,\ t = (x - x_k)/h,$$

где p_0 – начальная точка при $t = x_k$; p_1 – конечная точка при $t = x_{k+1}$; m_0 и m_1 – соответственно начальный (при $t = x_k$) и конечный (при $t = x_{k+1}$) векторы; $h_{00}(t)$ – $h_{11}(t)$ – базовые ермитовые полиномы:

$$h_{00}(t) = (1-t)^2(1+2t),\ h_{01}(t) = t^2(3-2t),\ h_{10}(t) = t(1-t)^2,\quad h_{11}(t) = t^2(t-1).$$

Результаты экспериментальных исследований предложенного метода моделирования с использованием валидационных информационных сигналов, полученных на образцах с известной степенью поврежденности при контроле методом низкоскоростного удара, позволили оценить среднеквадратическую погрешность имитации сигнала, которая не превышала $4,0 \cdot 10^{-3}$.

Литература

1. Еременко, В.С. Обнаружение ударных повреждений сотовых панелей методом низкоскоростного удара / В.С. Еременко, В.М. Мокийчук, А.М. Овсянкин // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2007. –№ 1. – С. 24–27.
2. Переїденко, А.В. Моделювання інформаційних сигналів при неруйнівному контролі стільникових панелей / А.В. Переїденко, П.А. Шегедін // Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП-2011) : 5-а міжнар. науково-технічна конф., 19-21 травня 2011р. : тези доп. – Вінниця, 2011. – С. 83–84.
3. Бабак, С.В. Статистическая диагностика электротехнического оборудования : моногр / С.В. Бабак, М.В. Мыслович, Р.М. Сысак. – К. : Ин-т электродинамики НАН Украины, 2015. – 456 с.